

二级倒立摆的拟人智能控制

廖道争

(三峡大学 电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 以二级倒立摆为被控对象, 利用拟人智能控制方法设计了系统的非线性控制律。与传统的控制方法相比, 拟人智能控制方法不受线性约束, 从而对于复杂的非线性被控对象可以得到满意的控制结果。对二级倒立摆控制系统进行了数字仿真, 仿真结果进一步验证了设计方案的有效性。

关键词: 拟人智能控制; 归约; 非线性系统; 二级倒立摆

中图分类号: TP273.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)05-0062-03

Design of Human-Imitating Intelligent Controller for Double Inverted Pendulum

Liao Daozheng

(School of Electrical and Information, Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China)

Abstract: Taking the double inverted pendulum as a plant to be controlled, a nonlinear control law is proposed according to human-imitating intelligent control method. Compared with traditional design, human-imitating control is not restricted to linear assumption. Consequently, as for the complicated nonlinear objects, applying this control method can achieve satisfactory results while the object's physical model is available. Finally, the results of simulations verified the validity of this design.

Key words: human-imitating intelligent control; reduction; nonlinear systems; double inverted pendulum

随着科技的发展, 被控对象越来越复杂, 系统表现出严重的非线性和不确定性。为解决具有强非线性系统的控制问题, 像反馈线性化、Backstepping 等方法相继被提出, 但这些方法要求系统满足特定的结构形式。变结构控制也是应用比较广泛的一种非线性控制方法, 但在实际应用中需要将非线性系统模型进行线性化后针对线性模型来设计滑模面。如果直接针对非线性模型选取滑模面, 则结果可能不惟一, 甚至无法保证所选滑模面运动的稳定性。

神经网络控制和模糊控制等智能控制的一个重要特点是控制器设计不依赖于被控对象的精确数学模型, 从而为复杂非线性系统的控制问题提供了一条新的途径。模糊控制需要控制规则, 神经网络控制需要学习样本, 如果被控对象是难以线性化的复杂非线性系统, 没有成功控制它的经验, 那么神经网络控制和模糊控制也难以取得满意的控制效果。

基于物理模型的拟人智能控制方法为这类复杂的控制问题提供了一种新的思路^[1-5]。采用拟人智能控制方法, 人们首次成功实现了三级倒立摆的单电机稳定, 解决了当时的世界性控制难题^[1], 后来又先后实现了对平面运动倒立摆和平行单级倒立摆这些复杂非线性系统的稳定控制^[6]。这些成果说明这种方法在处理一些强非线性系统的控制问题时确实有着其实用性。本文采用拟人智能控制方法, 研究了二级倒立摆系统的控制器设计问题。

1 拟人智能控制方法简介

拟人智能控制是一种基于被控对象物理模型的设计方法。物理模型是指被控对象的物理结构、参数和运动特征等。拟人智能控制的核心是广义归约和拟人设计控制律。所谓归约就是化简, 即将待解决的复杂控制问题逐层分解为复杂程度较低的子问题, 并最终

收稿日期: 2008-07-28

作者简介: 廖道争(1969-), 男, 安徽宿松人, 三峡大学讲师, 博士, 主要从事智能控制, 非线性控制方面的研究。

得到可直接解决的本原问题集。本原问题一经解决，各层子问题以致初始复杂问题均可逐级解决。广义归约是人工智能中归约方法的延伸，人工智能的归约只关心解决子问题的顺序，而不考虑相互之间的耦合问题；广义归约则必须确认和解决子问题之间可能存在的耦合问题。在对被控对象的物理模型进行广义归约后，利用有关学科知识、根据人的一般控制经验和宏观决策能力等直接写出定性控制律。在得到定性控制律后，一般通过遗传算法或模拟退火算法等优化算法，搜索出控制律的具体参数，从而得到实用的定量控制律^[7-8]。拟人控制设计的一般流程如图1所示。

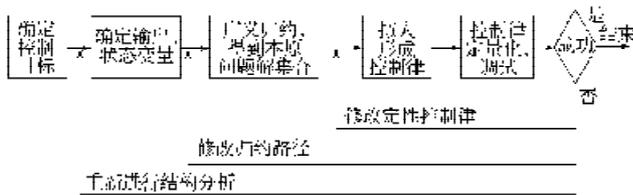


图1 拟人智能控制设计流程

Fig. 1 The flow chart of human-imitating intelligent control design

2 二级倒立摆的拟人控制器设计

2.1 二级倒立摆系统结构与模型

二级倒立摆结构如图2所示。其控制目标是通过小车的运动，使摆杆稳定在竖直位置而不倒。

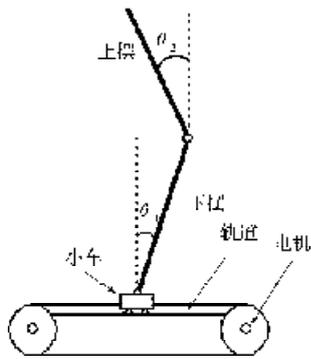


图2 二级倒立摆结构图

Fig. 2 The structure of the double inverted pendulum

采用拉格朗日方程建立其数学模型如下：

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - Ku, \tag{1}$$

其中： $q = [x \ \theta_1 \ \theta_2]^T$ ， x 为小车位移；

$$M(q) = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \cos \theta & h_3 \cos \theta_2 \\ h_2 \cos \theta_1 & h_4 & h_5 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ h_3 \cos \theta_2 & h_5 \cos(\theta_1 - \theta_2) & h_6 \end{bmatrix};$$

$$N(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} \mu_0 & -h_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 & -h_3 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ 0 & \mu_1 + \mu_2 & h_3 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - \mu_2 \\ 0 & -h_2 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) - \mu_2 & \mu_2 \end{bmatrix};$$

$$G(q) = -[0 \ k_2 g \sin \theta_1 \ k_3 g \sin \theta_2]^T;$$

$$K = [k_x \ 0 \ 0]^T;$$

$$h_1 = m_0 + m_1 + m_2, \ h_2 = m_1 l_1 + m_2 L_2,$$

$$h_3 = m_2 l_2, \ h_4 = m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2 + J_1,$$

$$h_5 = m_2 l_2 L_1, \ h_6 = m_2 l_2^2 + J_2,$$

$$h_7 = (m_1 l_1 + m_2 L_1)g, \ h_8 = m_2 g l_2.$$

上述公式中： J_1 和 J_2 分别为下摆和上摆相对其质心的转动惯量；

l_1 和 l_2 分别为下摆和上摆的质心到其转轴的距离；

L_1 为下摆的全长；

m_0 、 m_1 和 m_2 分别表示小车、下摆和上摆的质量；

μ_0 表示小车与轨道之间的摩擦系数；

μ_1 和 μ_2 分别表示下摆与小车，上摆与下摆连接轴摩擦系数。

2.2 二级倒立摆拟人智能控制器设计

2.2.1 拟人定性控制律的设计

首先，需要基于二级倒立摆的物理模型对二级摆的控制问题进行广义归约，得到本原问题集；然后，基于各本原问题的解以及各子问题间的相互耦合关系，形成拟人定性控制律。

二级倒立摆上摆的控制力是由作用在小车上的控制力通过下摆传递给上摆的，归约时，可以首先考虑下摆和小车的稳定问题。在解决下摆和小车的稳定问题后，将下摆和小车作为一个整体等效为单级倒立摆的小车系统，从而将二级倒立摆的控制问题分解为2个单级倒立摆问题进行解决（单级倒立摆的具体归约和拟人定性控制律形成方法参见文献[3]）。

二级倒立摆系统控制的主要矛盾是解决上摆的控制稳定问题，其次是处理下摆与小车构成的整体。

因此，首先实现对上摆的稳定控制，使得 $\theta_2 \rightarrow 0$ ， $\dot{\theta}_2 \rightarrow 0$ ；然后实现对下摆的稳定控制，即使得 $\theta_1 \rightarrow 0$ ， $\dot{\theta}_1 \rightarrow 0$ ；最后实现对小车的稳定控制，即使得 $x \rightarrow 0$ ， $\dot{x} \rightarrow 0$ 。通过归约可以形成最简洁的定性控制策略，即线性控制律：

$$u = k_1 \cdot x + k_2 \cdot \dot{x} + k_3 \cdot \theta_1 + k_4 \cdot \dot{\theta}_1 + k_5 \cdot \theta_2 + k_6 \cdot \dot{\theta}_2. \tag{2}$$

根据主要矛盾和次要矛盾的关系，上摆状态变量的增益最大，下摆次之，小车状态变量的增益最小。这些可以在定性控制律的定量化搜索过程中通过增加相应的约束条件加以体现。由于实际系统的控制电机能量有限，电机在电压较小时存在非线性性，为提高控制电机在控制作用较小时的响应速度，可以在系统的控制律中引入非线性函数 f ，如取如下的开方控制律形式：

$$u = f(k_1 \cdot x + k_2 \cdot \dot{x} + k_3 \cdot \theta_1 + k_4 \cdot \dot{\theta}_1 + k_5 \cdot \theta_2 + k_6 \cdot \dot{\theta}_2) -$$

$$u_{\text{max}} \sqrt{\frac{-k_{\theta_2} \cdot \theta_2 - k_{\dot{\theta}_2} \cdot \dot{\theta}_2 + k_{\theta_1} \cdot \theta_1 + k_{\dot{\theta}_1} \cdot \dot{\theta}_1 - k_{\dot{x}} \cdot \dot{x} - k_x \cdot x}{u_{\text{max}}}} \quad (3)$$

式中 u_{max} 为电机峰值输出。由于开方函数在 $(0, 1)$ 上的值大于其自变量, 这样, 在小信号时, 就会放大电机的控制作用, 使其响应速度更快。

在得到二级倒立摆的定性控制律(3)后, 再基于系统非线性动力学模型(1), 通过遗传算法或模拟退火等优化方法, 得到实用的定量控制律, 即确定出 $k_x, k_{\dot{x}}, k_{\theta_1}, k_{\dot{\theta}_1}, k_{\theta_2}, k_{\dot{\theta}_2}$ 的具体数值。

2.2.2 定性控制律的量化

利用遗传算法得到定量的控制律参数。

系统仿真时倒立摆存在稳定和不稳定2种状态, 为了将其区分, 首先定义一个标志量 f_{state} , 当系统仿真收敛时, f_{state} 的值为0.5; 当系统仿真发散时, 定义 f_{state} 的值与发散的时间成正比, 如下式所示:

$$f_{\text{state}} = \begin{cases} 0.5, & 10 \text{ s 仿真收敛;} \\ 0.5 \times \frac{t}{10}, & 10 \text{ s 仿真发散, } t \text{ 为发散时刻。} \end{cases}$$

进一步定义适应度函数: $\text{fitness} = f_{\text{state}} + \frac{1}{2 - b \sum k_i x_i^2}$, 式中: x_i 为系统状态;

$k_i > 0, b > 0$ 为根据需要选定的系数。

另外, 实际系统是有条件限制的, 考虑到电机能提供的能量和轨道长度有限, 规定摆杆偏角超过 1 rad , 小车位置超过 0.8 m 认为仿真发散。

利用 MATLAB 遗传算法工具箱对适应度函数进行优化, 得出其最优值以及对应的控制律参数取值, 从而得到定量的控制律。

3 仿真结果

二级倒立摆系统参数为: $m_0=0.3 \text{ kg}; m_1=0.4 \text{ kg}; m_2=0.5 \text{ kg}; L_1=L_2=0.36 \text{ m}; l_1=l_2=0.18 \text{ m}$ 。首先设计系统的拟人控制律, 采用遗传算法进行控制律的量化。参数搜索中, 规定最优个体的适应度值大于 0.99 时认为搜索收敛。某次搜索得到的拟人控制律参数为 $k_x=-200, k_{\dot{x}}=-16.5, k_{\theta_1}=850, k_{\dot{\theta}_1}=10, k_{\theta_2}=-1580, k_{\dot{\theta}_2}=-50$ 。采用该控制律参数对二级倒立摆系统进行仿真控制, 图3为仿真控制结果。由图3可以看出: 闭环系统收敛, 从而控制器设计方案是有效的。

4 结论

以二级倒立摆作为被控对象, 研究了非线性系统

的控制器设计问题。与微分几何方法相比, 拟人智能控制方法不要求被控对象的数学模型满足特定的结构, 也不受“线性”的约束。在形成控制律时, 拟人控制方法可以模拟人的控制经验以及被控对象的实际情况进行控制律的设计, 从而为复杂的强非线性系统的控制器设计提供了一条新的思路。

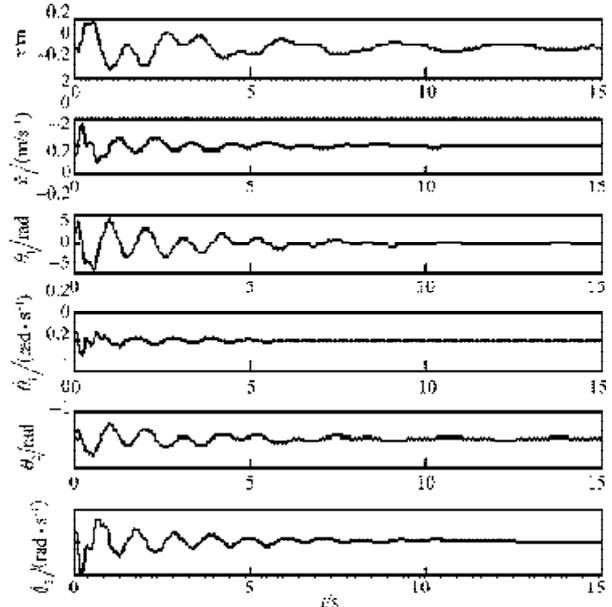


图3 二级倒立摆仿真控制状态曲线

Fig. 3 The state response of human-imitating controller

参考文献:

- [1] Zhang Minglian, Hao Jiankang, He Weidong. Human-imitating intelligent control and tripleinverted-pendulum[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1996, 9(2): 135-146.
- [2] 张明廉, 孙昌龄, 杨亚炜. 拟人控制二维单倒立摆[J]. 控制与决策, 2002, 17(1): 53-56.
- [3] 杨亚炜. 基于物理模型的拟人智能控制理论研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999.
- [4] 关世勇, 魏衡华, 陈星. 拟人智能控制在二轮小车倒立摆系统中的应用[J]. 控制工程, 2006, 13(5): 433-435.
- [5] 袁飞, 董朝阳, 王小虎, 等. 基于拟人智能控制的BTT导弹姿态控制[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(9): 1976-1982.
- [6] 李诚. 拟人智能控制理论研究与应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2005.
- [7] 石晓荣, 张明廉. 一种基于混沌神经网络的拟人智能控制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(9): 889-892.
- [8] 司昌龙, 张明廉. 一种拟人智能控制的控制律定量方法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(3): 381-383.

(责任编辑: 张亦静)